

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage,  
Projektionsobjektiv hierfür  
sowie darin enthaltenes optisches Element

=====

Die Erfindung betrifft eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einer Beleuchtungseinrichtung zur Erzeugung von Projektionslicht, einem Projektionsobjektiv zum Abbilden eines Retikels auf eine lichtempfindliche Oberfläche und mit einem in dem Projektionsobjektiv angeordneten optischen Element zum Einstellen einer gewünschten Polarisierung des Projektionslichts. Die Erfindung betrifft ferner ein Projektionsobjektiv und ein darin anordenbares optisches Element für eine derartige Projektionsbelichtungsanlage.

Eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage dieser Art ist aus der DE 101 25 487 A1 bekannt.

Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlagen, wie sie etwa bei der Herstellung hochintegrierter elektrischer Schaltkreise verwendet werden, weisen eine Beleuchtungseinrichtung auf, die der Erzeugung eines Projektionslichtbündels dient. Das Projektionslichtbündel wird auf ein Retikel gerichtet, das die von der Projektionsbelichtungsanlage ab-

zubildenden Strukturen enthält und in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs verfahrbar angeordnet ist. Ein Projektionsobjektiv bildet die Strukturen des Retikels auf eine lichtempfindliche Oberfläche ab, die sich in einer  
5 Bildebene des Projektionsobjektivs befindet und z.B. auf einem Wafer aufgebracht sein kann.

Bei derartigen Projektionsbelichtungsanlagen wird zunehmend Projektionslicht im fernen Ultraviolettbereich eingesetzt, da die Auflösung der Projektionsobjektive zunimmt, je kleiner die Wellenlänge des Projektionslichts ist. Bei derart  
10 kurzen Wellenlängen nimmt allerdings die Absorption herkömmlicher Linsenmaterialien wie Quarz oder Glas deutlich zu. Als Ersatz für diese Materialien werden deswegen immer häufiger Kristalle aus Flußspat ( $\text{CaF}_2$ ) eingesetzt, deren  
15 Herstellung und Verarbeitung zwar technologisch schwierig ist, die aber dafür auch bei Wellenlängen von 157 nm und darunter noch hochtransparent sind.

Flußspatkristalle haben allerdings die Eigenschaft, doppelbrechend zu sein. Unter Doppelbrechung versteht man die Abhängigkeit des Brechungsindex und damit der Ausbreitungsgeschwindigkeit hindurchtretenden Lichts von der Polarisierung und Richtung des Lichtstrahls. Die sogenannte intrinsische Doppelbrechung von  $\text{CaF}_2$  geht auf die Kristallstruktur zurück und läßt sich bei bekannter Kristallorientierung  
20 und Wellenlänge relativ genau berechnen. Mehr Probleme bereitet die Doppelbrechung, die durch mechanische Spannungen im Kristallgitter induziert ist. Diese Spannungen können

ihre Ursache im Wachstumsprozeß des Kristalls, aber auch in äußeren Einflüssen wie Linsenfassungen o.ä. haben. Die spannungsinduzierte Doppelbrechung läßt sich im allgemeinen nicht vorhersehen und ist daher nur auf meßtechnischem Wege  
5   erfaßbar.

SOP

Die Doppelbrechung von  $\text{CaF}_2$ -Linsen führt einer Verringerung des Auflösungsvermögens des Projektionsobjektivs. Außerdem erschweren derartige Linsen die Einstellung eines gewünschten Polarisationszustands des Projektionslichts. So kann es  
10   z.B. zweckmäßig sein, die lichtempfindliche Oberfläche auf dem Wafer mit zirkular polarisiertem Licht zu belichten.

Um zumindest die intrinsische Doppelbrechung von  $\text{CaF}_2$ -Linsen zu kompensieren, wird in der eingangs erwähnten DE 101 25 487 A1 vorgeschlagen, mehrere aus  $\text{CaF}_2$  bestehende  
15   Linsen in bestimmter Weise zueinander zu verdrehen. Je größer die Zahl der aus  $\text{CaF}_2$  bestehenden Linsen ist, desto leichter läßt sich dabei eine Kompensation erzielen. Allerdings läßt sich die Doppelbrechung auf diese Weise nur  
20   teilweise kompensieren, d.h. es verbleibt stets ein nicht vernachlässigbarer Restfehler. *Clocking*

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannten Art derart zu verbessern, daß sich eine gewünschte Polarisation des Projektionslichts noch genauer als bei den bekannten Projektionsbelichtungs-  
25   anlagen einstellen läßt. Aufgabe der Erfindung ist es außerdem, ein entsprechendes Projektionsobjektiv sowie ein

darin anordenbares optisches Element anzugeben, das die Einstellung der Polarisierung des Projektionslichts ermöglicht.

Bei einer Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannte Art wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß das optische Element einen Träger sowie mindestens eine darauf angeordnete und von dem Projektionslicht durchsetzbare Schicht mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen aufweist, deren Abstand voneinander kleiner als die Wellenlänge des Projektionslichts ist und deren Anordnung lokal innerhalb der mindestens einen Schicht variiert.

Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, daß sich mit formdoppelbrechenden und lokal variierenden Gitterstrukturen sehr genau definierte Polarisierungseigenschaften einstellen lassen. Der Einfluß der Doppelbrechung von  $\text{CaF}_2$ -Linsen auf die Polarisierung des Projektionslichts kann auf diese Weise sehr zielgerichtet kompensiert werden. Formdoppelbrechung ist eine Eigenschaft, die auf die inhomogene Materialverteilung in Gittern zurückgeht und vor allem dann hervortritt, wenn der Abstand der Gitterstrukturen kleiner ist als die Wellenlänge des einfallenden Lichts. Bei ausreichend kleinen Gitterstrukturen ist schließlich nur noch die nullte Beugungsordnung ausbreitungsfähig. Vorzugsweise beträgt daher der Abstand der Gitterstrukturen bei dem optischen Element weniger als 70%, insbesondere weniger als 30% der Wellenlänge des Projektionslichts.

Das optische Element wird vorzugsweise möglichst nahe einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs angeordnet, damit in einer anderen Pupillenebene die gewünschte räumliche Verteilung der Polarisierung erzielt wird.

- 5 Formdoppelbrechende Gitterstrukturen als solche sind im Stand der Technik bekannt. In einem Aufsatz von Z. Bomzon et al. mit dem Titel "Space-Variant Polarization-State Manipulated with Computer-Generated Subwavelength Gratings", Optics & Photonics News, vol. 12, no. 12, Dec. 2001, Seite 10 33, ist beispielsweise beschrieben, daß sich durch computergestützte Berechnungsverfahren die Gitterperiode und die Richtung der Gitterlinien so bestimmen lassen, daß mit solchen Gittern versehene Polarisatoren oder Verzögerungsplättchen polarisiertes Licht in jede gewünschte Polarisierung 15 umwandeln können.

- Bislang wurden formdoppelbrechende Strukturen für die Anwendung in mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen jedoch nie in Betracht gezogen. Dies hängt vor allem mit den sehr kurzen Wellenlängen zusammen, die in derartigen 20 Anlagen für das Projektionslicht verwendet werden. Zwar lassen sich z.B. im Wege der Elektronenstrahlolithographie entsprechend kleine Gitterstrukturen im Sub-Wellenlängenbereich herstellen, diese Strukturen haben dann jedoch ein so geringes Aspektverhältnis (Verhältnis von Strukturtiefe zu Strukturbreite), daß sich auf diese Weise nur relativ 25 geringe Verzögerungen aufgrund von Doppelbrechung erzielen lassen. Aus diesem Grund sind in dem o.a. Aufsatz als Bei-

spiel auch nur Gitter genannt, die für Licht mit einer Wellenlänge von 10.6  $\mu\text{m}$ , d.h. Infrarotlicht, geeignet sind.

Um mit den formdoppelbrechenden Strukturen auch höhere Verzögerungen zu erzielen zu können, durchsetzt das Projektionslicht vorzugsweise zwei - nicht notwendigerweise unterschiedliche - formdoppelbrechende Gitterstrukturen. Auf diese Weise läßt sich eine so hohe Verzögerung durch die Doppelbrechung erzielen, daß damit auch der Einfluß einer durch dickere  $\text{CaF}_2$ -Linsen verursachten Doppelbrechung auf das Projektionslicht praktisch vollständig kompensiert werden kann. Aufgrund der lokal innerhalb der Schicht variierenden Anordnung der Gitterstrukturen lassen sich auch räumlich sehr inhomogene Verstimmungen der Polarisationswirkungsvoll kompensieren, wie sie etwa bei  $\text{CaF}_2$ -Linsen durch spannungsinduzierte Doppelbrechung hervorgerufen werden.

Die einfachste Möglichkeit, das Projektionslicht wenigstens zwei formdoppelbrechende Gitterstrukturen durchsetzen zu lassen, besteht darin, bei dem optischen Element wenigstens zwei in Ausbreitungsrichtung des Projektionslichts hintereinander angeordnete Schichten mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen vorzusehen. Dabei kann auf einen Träger verzichtet werden, wenn zwei Schichten auf gegenüberliegenden Seiten eines einzigen Trägers angeordnet sind. Es können aber auch mehrere, ggf. miteinander verbundene Träger vorgesehen sein, auf denen jeweils eine oder mehrere Schichten mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen auf-

bracht sind. Vorzugsweise sind die Gitterstrukturen innerhalb der Schichten als Liniengitter ausgebildet, deren Periode und/oder Orientierung von Schicht zu Schicht variiert.

- 5 Mit mehreren hintereinander angeordneten Schichten läßt sich eine vertikale Struktur erzielen, die derjenigen ähnelt, die in Kristallen deren Polarisationsseigenschaften bestimmen. Wenn mehrere Schichten unmittelbar übereinander aufgebracht sind, ist es allerdings aus herstellungstechnischen Gründen nicht ohne weiteres möglich, ein Gas wie etwa  
10 Luft als die Gitterstrukturen umgebendes Medium zu verwenden. Dies ist insofern nachteilig, als dadurch keine so hohen Brechzahldifferenzen und damit Doppelbrechungen erzielbar sind. Werden die Schichten hingegen auf unterschiedlichen  
15 Trägern angeordnet, so besteht diese Beschränkung nicht, weswegen solche Elemente besonders dann vorteilhaft eingesetzt werden können, wenn besonders hohe Verzögerungen infolge Doppelbrechung erzielt werden sollen.

- Ein weiterer Vorteil mehrerer Schichten besteht darin, daß  
20 sich damit die Polarisationsseigenschaften flexibler einstellen lassen, als dies mit nur einer Schicht möglich ist. Anders als dies in dem o.a. Aufsatz von Z. Bomzon et al. dargestellt wird, hat eine einzige Schicht mit doppelbrechenden Gitterstrukturen nämlich nur die Wirkung eines Ver-  
25 zögerungsplättchens. Damit läßt sich z.B. keine Rotation der Polarisationsrichtung um einen Winkel  $\phi$  erzielen. Eine beliebige Veränderung der Polarisation ist erst dann mög-



lich, wenn das optische Element wenigstens drei Schichten mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen hat, wobei zwei Schichten an zueinander korrespondierenden Punkten die Wirkung von zueinander verdrehten Viertelwellenlängenplättchen haben und die dazwischen angeordnete Schicht die Wirkung eines Halbwellenlängenplättchens hat.

Bei dem Träger kann es sich um ein eigenes Substrat, z.B. ein dünnes Quarzplättchen, handeln. Ein zusätzlicher Träger ist jedoch entbehrlich, wenn als Träger ein ohnehin vorhandenes refraktives optisches Element des Projektionsobjektivs verwendet wird. Eine Schicht von Gitterstrukturen kann dann z.B. durch Strukturieren einer Oberfläche des refraktiven optischen Elements erzeugt werden. Alternativ hierzu ist möglich, auf der Oberfläche des refraktiven optischen Elements ein räumlich entsprechend strukturiertes Dielektrikum, z.B.  $\text{LaF}_3$ , aufzubringen.

Eine andere Möglichkeit, das Projektionslicht wenigstens zwei formdoppelbrechende Gitterstrukturen durchsetzen zu lassen, besteht darin, als Träger ein reflektives optisches Element mit einer Verspiegelung vorzusehen, so daß das Projektionslicht einmal vor und einmal nach Reflexion an der Verspiegelung die formdoppelbrechenden Gitterstrukturen der mindestens einen Schicht durchsetzt. Derartige, als Träger geeignete reflektive optische Elemente mit einer Verspiegelung finden sich z.B. meist in einer Pupillenebene bei katadioptrischen Teilen von Projektionsobjektiven.

Die lokal innerhalb der Schicht variierende Anordnung der Gitterstrukturen kann auf unterschiedliche Weise realisiert sein.

- Herstellungstechnisch besonders einfach ist es, wenn die
- 5 Gitterstrukturen innerhalb der mindestens einen Schicht eine konstante Strukturtiefe, aber einen lokal variierenden Füllfaktor haben. Der Füllfaktor kann z.B. dadurch Veränderung der Strukturbreite bei konstant gehaltener Gitterperiode variiert werden.
- 10 Bei einer anderen Variante für die Variation der Anordnung der Gitterstrukturen haben die Gitterstrukturen innerhalb der mindestens einen Schicht einen konstanten Füllfaktor, aber variierende Strukturtiefen. Der Füllfaktor wird dann vorzugsweise so gewählt, daß sich eine maximale
- 15 Doppelbrechung ergibt.

- Hinsichtlich des Projektionsobjektivs wird die oben erwähnte Aufgabe durch ein Projektionsobjektiv mit den Merkmalen des Anspruchs 15 und hinsichtlich des optischen Elements durch ein optisches Element mit den Merkmalen des Anspruchs
- 20 17 gelöst. Die vorstehenden Bemerkungen zu den Vorteilen und vorteilhaften Ausgestaltungen gelten hierbei entsprechend.

- Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele
- 25 anhand der Zeichnung. Darin zeigen:

- Figur 1 einen Meridionalschnitt durch eine Projektionsbe-  
lichtungsanlage in stark vereinfachter, nicht  
maßstäblicher Darstellung;
- 5      Figur 2 ein erstes Ausführungsbeispiel eines optischen  
Elements zur Einstellung einer gewünschten Pola-  
risation in einer perspektivischen, nicht maß-  
stäblichen Teildarstellung;
- 10      Figur 3 eine Verteilung der Strukturbreite über der Flä-  
che des in Figur 2 dargestellten optischen Ele-  
ments;
- Figur 4 ein zweites Ausführungsbeispiel eines optischen  
Elements zur Einstellung einer gewünschten Pola-  
risation in einer perspektivischen, nicht maß-  
stäblichen Teildarstellung;
- 15      Figur 5 ein drittes Ausführungsbeispiel eines optischen  
Elements zur Einstellung einer gewünschten Pola-  
risation in geschnittener Darstellung;
- Figur 6 ein viertes Ausführungsbeispiel eines optischen  
Elements zur Einstellung einer gewünschten Pola-  
20      risation in geschnittener Darstellung;
- Figur 7 ein fünftes Ausführungsbeispiel eines optischen  
Elements zur Einstellung einer gewünschten Pola-

risation in einer perspektivischen, nicht maßstäblichen Teildarstellung.

- Figur 1 zeigt einen Meridionalschnitt durch eine insgesamt mit 10 bezeichnete Projektionsbelichtungsanlage in stark vereinfachter, nicht maßstäblicher Darstellung. Die Projektionsbelichtungsanlage 10 weist eine Beleuchtungseinrichtung 12 auf, die der Erzeugung gebündelten Projektionslichts 14 dient und eine Lichtquelle 16 sowie eine mit 18 angedeutete Beleuchtungsoptik umfaßt. Die Wellenlänge  $\lambda$  des Projektionslichts 14 liegt im fernen Ultraviolettbereich und beträgt 193 nm. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 12 und einem Projektionsobjektiv 20 der Projektionsbelichtungsanlage 10 ist ein Retikel 22 in einer Objektebene 24 des Projektionsobjektivs 20 verfahrbar angeordnet.
- Das Projektionsobjektiv 20 dient dazu, auf dem Retikel 22 enthaltene und von dem Projektionslicht 14 durchtretene Strukturen verkleinert in eine Bildebene 26 des Projektionsobjektivs 20 abzubilden. In der Bildebene 26 befindet sich eine auf einem Wafer 28 aufgebrachte lichtempfindliche Oberfläche 30, bei der es sich z.B. um einen Photolack handeln kann.

- Die in dem Projektionsobjektiv 20 enthaltenen optischen Komponenten sind in Figur 1 nur angedeutet und umfassen u.a. einen Strahlteilerwürfel 32 und einen katadioptrischen Teil 34, der ein mit 36 angedeutetes Linsensystem und einen abbildenden Spiegel 38 umfaßt. Zur Veranschaulichung ist in

Figur 1 ein Strahlengang 39 des Projektionslichts 14 im katadioptrischen Teil 34 eingezeichnet. Das Projektionsobjektiv 20 enthält ferner einen Umlenkspiegel 40 sowie einen insgesamt mit 42 bezeichneten dioptrischen Teil, der eine  
5 Vielzahl von Linsen enthält, von denen in Figur 1 allerdings nur einige wenige beispielhaft angedeutet und mit 46, 48 und 50 bezeichnet sind.

Die der Bildebene 26 nächstliegende Linse 50 besteht aus einem Flußspatkristall ( $\text{CaF}_2$ ) in einem 111-Schnitt. Der  
10 Einfachheit halber sei angenommen, daß die Linse 50 keine spannungsinduzierte, sondern nur eine intrinsische Doppelbrechung aufweist. Die Richtung der langsameren Achse, in der der Brechungsindex größer ist, variiert dann über die Pupille, und zwar aufgrund der dreizähligen Kristallsymmetrie mit einer ebenfalls dreizähligen Symmetrie. Außerdem  
15 variiert auch der Betrag der durch die Doppelbrechung hervorgerufenen Verzögerung über die Pupille.

Um die durch die Linse 50 hervorgerufenen Polarisations-  
effekte zu kompensieren, ist in einer Pupillenebene 52 des  
20 Projektionsobjektivs 20 ein die Polarisation beeinflussendes optisches Element 54 angeordnet.

Figur 2 zeigt das optische Element 54 in einer perspektivischen, nicht maßstäblichen Teildarstellung. Das optische Element 54 besteht aus einem Träger 56 aus Quarz, auf dem  
25 eine Schicht 57 aus parallelen Gitterstrukturen angeordnet ist, die mit konstanter Gitterperiode  $g$  voneinander beab-

standet sind. Bei diesem Ausführungsbeispiel haben die Gitterstrukturen 58 die gleiche Strukturtiefe  $d$ , aber unterschiedliche Strukturbreiten  $b_1$ . Die Gitterperiode  $g$  ist mit 40 nm deutlich kleiner als die Wellenlänge  $\lambda = 193$  nm des Projektionslichts 14, so daß die Gitterstrukturen 58 stark formdoppelbrechend wirken und nur die nullte Beugungsordnung transmittiert wird. Die Formdoppelbrechung hat zur Folge, daß Licht 60 mit einer zur Längsausdehnung der Gitterstrukturen 58 parallelen Polarisierung einem größeren effektiven Brechungsindex ausgesetzt ist als senkrecht dazu polarisiertes Licht 62.

Da für die Gitterkonstante  $g \ll \lambda$  gilt, läßt sich die Doppelbrechung nach dem Modell des effektiven Mediums bestimmen. Danach ergibt sich für den Brechungsindex  $n_{||}$  für Licht 60, dessen Polarisierung parallel zu den Gitterstrukturen 58 verläuft,

$$n_{||}^2 = F n^2 + (1 - F) n_0^2 \quad , \quad (1)$$

und für den Brechungsindex  $n_{\perp}$  für Licht 62, dessen Polarisierung senkrecht zu den Gitterstrukturen 58 verläuft,

$$n_{\perp}^2 = \frac{n^2 n_0^2}{F n_0^2 + (1 - F) n^2} \quad , \quad (2)$$

wobei  $n$  den Brechungsindex des Strukturmaterials,  $n_0$  den Brechungsindex des umgebenden Mediums und  $F$  den Füllfaktor

bezeichnet. Der Füllfaktor  $F$  ergibt sich aus dem Verhältnis von Strukturbreite  $b$  zur Gitterkonstante  $g$ , d.h.

$$F = \frac{b}{g} \quad . \quad (3)$$

Die Doppelbrechung  $\Delta n$  ist definiert als die Differenz zwischen  $n_{||}$  und  $n_{\perp}$ , d.h.  $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$ .

- 5 Bei dem optischen Element 54 variiert die Strukturbreite  $b$  lokal, so daß der Füllfaktor  $F$  und somit auch die Doppelbrechung  $\Delta n$  eine Funktion der Pupillenkoordinaten  $v_x$  und  $v_y$  ist. Der Übersichtlichkeit halber wird im folgenden diese Abhängigkeit bei der Schreibweise unterdrückt, so daß die
- 10 nachfolgend aufgeführten Beziehungen nur für jeweils einen Pupillenpunkt gelten.

- Um die Doppelbrechung der Linse 50 zu kompensieren, ist zunächst deren Größe und Richtung in Abhängigkeit von den Pupillenkoordinaten zu bestimmen. Die intrinsische Doppelbre-
- 15 chung von  $\text{CaF}_2$  kann relativ gut berechnet werden; spannungsinduzierte Doppelbrechungsverteilungen werden vorzugsweise meßtechnisch ermittelt. Dies führt zu einer Jones-Matrix in der Pupille, die im folgenden als  $J$  bezeichnet wird. Um mit Hilfe des optischen Elements 54 eine gewünschte
- 20 Gesamtpolarisation mit der Jones-Matrix  $J_{\text{ideal}}$  zu erzielen, ist die folgende Matrixgleichung zu lösen:

$$K \cdot J = J_{\text{ideal}} \quad , \quad (4)$$

wobei  $K$  die Jones-Matrix des optischen Elements 54 ist. Die gewünschte Gesamtpolarisation  $J_{\text{ideal}}$  kann dabei z.B. konstant über die Pupille sein, so daß  $J_{\text{ideal}}$  die Einheitsmatrix ist. Je nach Anwendung kann es jedoch auch zweckmäßig sein, andere Gesamtpolarisationen einzustellen. In Betracht kommt hier z.B., das optische Element 54 zu auszuführen, daß sich in Kombination mit der Linse 50 die Wirkung eines Viertelwellenlängenplättchens ergibt.

In jedem Punkt der Pupille entspricht die Wirkung der doppelbrechenden Linse 50 derjenigen eines linearen, um einen Winkel verdrehten Verzögerungsplättchens mit einer gegebenen Verzögerung. Um diese Wirkung zu kompensieren, muß auch das optische Element 54 an jedem Punkt der Pupille wie ein um einen Winkel  $\psi$  verdrehtes Verzögerungsplättchen mit der Verzögerung  $\Delta\varphi$  wirken. Aus der Lösung der Gleichung (4) ergibt sich dann für jede Pupillencoordinate ein Tupel  $(\psi, \Delta\varphi)$ , das die Richtung  $\psi$  der Gitterstrukturen 58 und die dadurch hervorgerufene Verzögerung  $\Delta\varphi$  beschreibt. Aus der Verzögerung  $\Delta\varphi$  läßt sich dann über die Beziehung

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2 n d} \Delta\varphi \quad (5)$$

die Doppelbrechung  $\Delta n$  und daraus mit Hilfe der Gleichungen (1), (2) und (3) über den Füllfaktor  $F$  die Strukturbreite  $b$  an der jeweiligen Pupillencoordinate bestimmen.



- Die sich daraus ergebende Verteilung der Strukturbreiten  $b(v_x, v_y)$  über die Pupille ist in Figur 3 qualitativ dargestellt. Die Strukturbreite steigt dabei mit zunehmender Strichstärke an und liegt bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel zwischen 2 und 16 nm. Gut erkennbar ist in Figur 3, wie sich die dreizählige Symmetrie der Doppelbrechungsverteilung in dem  $\text{CaF}_2$ -Kristall der Linse 50 auch in einer entsprechenden Symmetrie der Strukturbreiten-Verteilung niederschlägt.
- 10 Eine Möglichkeit der Herstellung der Schicht 57 mit den Gitterstrukturen 58 besteht darin, zunächst die Anordnung der Gitterstrukturen 58 elektronenstrahlolithographisch festzulegen und anschließend die Gitterfurchen aus dem Quarz-Träger 56 herauszuätzen. Noch kleinere Gitterstruktu-
- 15 ren können auch im Wege der Raster-Tunnel- oder Raster-Kraft-Mikroskopie hergestellt werden.

- Anstatt die Strukturbreite  $b$  zu variieren, ist es natürlich ebenso möglich, den Füllfaktor  $F$  und damit die Doppelbrechung  $\Delta n$  über die Gitterkonstante  $g$  zu verändern. Da in
- 20 Gleichung (5) aber neben dem Füllfaktor  $F$  auch die Strukturtiefe  $d$  eingeht, kann auch der Füllfaktor  $F$  konstant gehalten und nur die Strukturtiefe  $d$  variiert werden.

- Dieser Fall ist in Figur 4 gezeigt. Die Gitterstrukturen 58a haben hier die gleiche Strukturbreite  $b$  und auch die
- 25 gleiche Gitterkonstante  $g$ , unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Strukturtiefe  $d_1$ . Darüber hinaus ist bei dem

- in Figur 4 gezeigten optischen Element 54a die Schicht 57a mit den Gitterstrukturen 58a nicht auf einem eigenen Träger, sondern auf einer pupillennahen Oberfläche 64 einer ohnehin in dem Projektionsobjektiv 20 vorhandenen Linse 66 aus Quarz oder  $\text{CaF}_2$  angeordnet. Die Gitterstrukturen 58a können dabei, wie in Figur 4 dargestellt, unmittelbar aus der Oberfläche 64 oder aber aus einem anderen, auf die Linsenoberfläche 64 aufgebrachten Material wie etwa  $\text{LaF}_3$  herausstrukturiert sein.
- 10 Die mit den optischen Elementen 54 und 54a erzielbaren Verzögerungen aufgrund von Doppelbrechung lassen sich allerdings nicht beliebig erhöhen, da sowohl die realisierbare Doppelbrechung als auch die technisch herstellbaren Aspektverhältnisse begrenzt sind.
- 15 Um dennoch höhere Verzögerungen aufgrund von Doppelbrechung zu erzielen, ohne dabei das Aspektverhältnis der Gitterstrukturen vergrößern zu müssen, können mehrere der in den Figuren 2 und 4 dargestellten optischen Elemente 54 bzw. 54a so hintereinander angeordnet werden, daß das Projektionslicht mehrere formdoppelbrechende Gitterstrukturen durchsetzt.
- 20 Eine Möglichkeit hierfür zeigt Figur 5. Das dort geschnitten dargestellte optische Element 54b umfaßt einen ersten und einen zweiten Träger 561b bzw. 562b, auf denen jeweils eine Schicht 571b bzw. 572b mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen 581b bzw. 582b angeordnet ist. Die Anordnung

der Gitterstrukturen 581b, 582b auf den Trägern 561b, 562b unterscheidet sich dabei voneinander, so daß die beiden Schichten 571b, 572b die Polarisierung des hindurchtretenden Projektionslichts 14 unterschiedlich beeinflussen. Die  
5 Schichten 571b und 572b sind dabei auf einander zugewandten Flächen der Träger 561b, 562b aufgebracht, so daß sie beide sehr genau innerhalb einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs 20 angeordnet werden können. Der Zwischenraum 68  
10 zwischen den Schichten 571b, 572b ist mit Luft oder einem anderen Gas gefüllt, wodurch sich eine hohe Brechzahldifferenz und damit eine hohe Doppelbrechung erzielen lassen.

Neben der größeren realisierbaren Verzögerung aufgrund der insgesamt größeren wirksamen Strukturtiefe hat eine Anordnung mit mehreren Schichten ferner den Vorteil, daß damit  
15 ein zusätzlicher Design-Freiheitsgrad zur Verfügung steht. Dies ermöglicht es, auch die Wirkungen von solchen doppelbrechenden Elementen zu kompensieren, die nicht denen eines Verzögerungsplättchens entsprechen.

Bei dem in Figur 6 in einer Schnittdarstellung gezeigten  
20 optischen Element 54c sind insgesamt drei Schichten 571c, 572c und 573c mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen 581c, 582c bzw. 583c hintereinander auf zwei Trägern 561c, 562c angeordnet, deren Anordnungen sich voneinander unterscheiden. Der Träger 562c trägt dabei auf seiner Vorderseite und seiner Rückseite jeweils eine Schicht 572c bzw.  
25 573c. Die Gitterstrukturen 581c, 582c und 583c sind dabei so gewählt, daß für jede Pupillenkoordinate die erste

Schicht 571c und die dritte Schicht 573c jeweils die Wirkung von zueinander verdrehten Viertelwellenlängenplättchen haben, während die dazwischen angeordnete Schicht 572c die Wirkung eines Halbwellenlängenplättchens hat. Auf diese  
5 Weise läßt sich mit dem optischen Element 54c die Polarisierung hindurchtretenden Projektionslichts 14 in beliebiger Weise verändern.

○ Eine weitere Möglichkeit, eine mehrfache Durchsetzung formdoppelbrechender Gitterstrukturen zur Erzielung höherer  
10 Verzögerungen zu realisieren, ist in Figur 7 gezeigt. Das dort perspektivisch und ausschnittsweise gezeigte optische Element 54d ist Teil des Spiegels 38, der in dem katadioptrischen Teil 34 des Projektionsobjektivs 20 angeordnet ist und einen Spiegelkörper 70 sowie eine darauf aufgebrachte,  
15 aus einem Schichtsystem bestehende Verspiegelung 72 umfaßt.

○ Die Schicht 57d mit Beugungsstrukturen 58d, die denen des in Figur 2 gezeigten optischen Elements 54 entsprechen, ist hier unmittelbar auf der Verspiegelung 72 aufgebracht. Auf den Spiegel 38 gerichtetes Projektionslicht 14 durchsetzt  
20 auf diese Weise die Beugungsstrukturen 58d zweimal, nämlich ein erstes Mal, bevor es auf die Verspiegelung 72 trifft, und ein zweites Mal, nachdem es an der Verspiegelung 72 reflektiert wurde.

○ Die Krümmung des Spiegels 72 ist der Einfachheit halber in  
25 Figur 7 nicht wiedergegeben, sondern nur in Figur 1 erkennbar.

- Es versteht sich, daß optische Elemente mit mehreren oder mehrfach durchsetzten Schichten auch dann vorteilhaft eingesetzt werden können, wenn es nicht auf eine besonders hohe Verzögerung aufgrund der Formdoppelbrechung ankommt, sondern eine einfache Herstellung der Schichten im Vordergrund steht. So läßt sich bei dem in Figur 7 gezeigten Ausführungsbeispiel das Aspektverhältnis um einen Faktor 2 im Vergleich zu einer Anordnung mit nur einer durchsetzten Schicht von ansonsten gleicher Ausführung verringern.
- 10 Optische Elemente mit mehreren Schichten können alternativ zu den vorstehend beschriebenen Ausgestaltungen auch realisiert werden, indem die Schichten mit den doppelbrechenden Gitterstrukturen unmittelbar, d.h. nur durch ein umgebendes Dielektrikum getrennt, übereinander angeordnet werden. Dem
- 15 Vorteil einer besonders hohen Kompaktheit steht dann allerdings der Nachteil gegenüber, daß alle festen Dielektrika einen höheren Brechungsindex haben als etwa Luft, wodurch sich die Doppelbrechung und damit die erzielbare Verzögerung verringert.

## Patentansprüche

=====

1. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einer Beleuchtungseinrichtung (12) zur Erzeugung von Projektionslicht (14), einem Projektionsobjektiv (20) zum Abbilden eines Retikels (14) auf eine lichtempfindliche Oberfläche (30) und mit einem in dem Projektionsobjektiv (20) angeordneten optischen Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) zum Einstellen einer gewünschten Polarisierung des Projektionslichts (14),
- dadurch gekennzeichnet, daß
- das optische Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) einen Träger (56; 66; 561b, 562b; 561c, 562c; 66; 34) sowie mindestens eine darauf angeordnete und von dem Projektionslicht (14) durchsetzbare Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c, 573c; 57d) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (58; 58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) aufweist, deren Abstand (g) voneinander kleiner als die Wellenlänge des Projektionslichts (14) ist und deren Anordnung lokal innerhalb der mindestens einen Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c; 57d) variiert.
2. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand (g) der Gitterstrukturen (58; 58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) weniger

als 70%, insbesondere weniger als 30% der Wellenlänge des Projektionslichts (14) beträgt.

3. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element (54b; 54c; 54d) so ausgeführt ist, daß das Projektionslicht (14) wenigstens zwei formdoppelbrechende Gitterstrukturen (581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) durchsetzt.
4. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element (54b; 54c) wenigstens zwei in Ausbreitungsrichtung des Projektionslichts (14) hintereinander angeordnete Schichten (571b, 572b; 571c, 572c, 573c) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (581b, 582b; 581c, 582c, 583c) aufweist.
5. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Schichten (572c, 573c) auf gegenüberliegenden Seiten des Trägers (562c) angeordnet sind.
6. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element (54c; 54d) mehrere Träger (561b, 562b; 561c, 562c) umfaßt, auf denen jeweils mindestens eine Schicht (571b, 572b; 571c, 572c, 573c) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (581b, 582b; 581c, 582c, 583c) angeordnet ist.

7. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterstrukturen (581b, 582b; 581c, 582c, 583c) innerhalb der Schichten (571b, 572b; 571c, 572c, 573c) als Linien-gitter ausgebildet sind, deren Periode und/oder Orientierung von Schicht zu Schicht variiert.
8. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element (54d) wenigstens drei Schichten (571c, 572c, 573c) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (581c, 582c, 583c) umfaßt, wobei zwei Schichten (581c, 583c) an zueinander korrespondierenden Punkten die Wirkung von zueinander verdrehten Viertelwellenlängenplättchen haben und die dazwischen angeordnete Schicht (582c) die Wirkung eines Halbwellenlängenplättchens hat.
9. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger ein refraktives optisches Element (66) des Projektionsobjektivs (20) ist.
10. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine Schicht (57a) von Gitterstrukturen (58a) durch Strukturieren einer Oberfläche des refraktiven optischen Elements (66) erzeugt ist.
11. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger ein

Sim.  
H.-K.-U.



reflektives optisches Element (34) mit einer Verspiegelung (72) ist, so daß das Projektionslicht (14) einmal vor und einmal nach Reflexion an der Verspiegelung (72) die formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (58d) der mindestens  
5 einen Schicht (57d) durchsetzt.

12. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das reflektive optische Element (34) in einer Pupillenebene eines katadioptrischen Teils (34) des Projektionsobjektivs (20) angeordnet ist.

10 13. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterstrukturen (58) innerhalb der mindestens einen Schicht (57) eine konstante Strukturtiefe (d), aber einen lokal variierenden Füllfaktor (F) haben.

15 14. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterstrukturen (58a) innerhalb der mindestens einen Schicht (57a) einen konstanten Füllfaktor (F), aber lokal variierende Strukturtiefen (d) haben.

20 15. Projektionsobjektiv für eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage (10) zum Abbilden eines Retikels (14) auf eine lichtempfindliche Oberfläche (30) und mit einem in dem Projektionsobjektiv (20) angeordneten optischen Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) zum Einstellen  
25 einer gewünschten Polarisierung von mit Hilfe einer Be-

leuchtungseinrichtung (12) erzeugten Projektionslicht (14),

dadurch gekennzeichnet, daß

das optische Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) einen Träger  
5 (56; 66; 561b, 562b; 561c, 562c; 66; 34) sowie mindestens  
eine darauf angeordnete und von dem Projektionslicht (14)  
durchsetzbare Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c,  
573c; 57d) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (58;  
58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) aufweist, deren  
10 Anordnung lokal innerhalb der mindestens einen Schicht (57;  
57a, 571b, 572b; 571c, 572c, 573c; 57d) variiert.

16. Projektionsobjektiv nach Anspruch 15, dadurch gekenn-  
zeichnet, daß das optische Element (54b; 54c; 54d) so  
ausgeführt ist, daß das Projektionslicht (14) wenigstens  
15 zwei formdoppelbrechende Gitterstrukturen (581b, 582b;  
581c, 582c, 583c; 58d) durchsetzt.

17. Optisches Element für die Verwendung in einer mikro-  
lithographischen Projektionsbelichtungsanlage (10),  
die eine Beleuchtungseinrichtung (12) zur Erzeugung von  
20 Projektionslicht (14) und ein Projektionsobjektiv (20) zum  
Abbilden eines Retikels (14) auf eine lichtempfindliche  
Oberfläche (30) umfaßt, wobei das optische Element (54;  
54a; 54b; 54c; 54d) in dem Projektionsobjektiv (20) an-  
ordenbar ist und zum Einstellen einer gewünschten Pola-  
25 risation des Projektionslichts (14) vorgesehen ist,

dadurch gekennzeichnet, daß

das optische Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) einen Träger  
(56; 66; 561b, 562b; 561c, 562c; 66; 34) sowie mindestens  
5 eine darauf angeordnete und von dem Projektionslicht (14)  
durchsetzbare Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c,  
573c; 57d) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (58;  
58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) aufweist, deren  
Anordnung lokal innerhalb der mindestens einen Schicht (57;  
10 57a, 571b, 572b; 571c, 572c, 573c; 57d) variiert.

18. Optisches Element nach Anspruch 17, dadurch gekenn-  
zeichnet, daß das optische Element (54; 54a; 54b; 54c;  
54d) so ausgeführt ist, daß das Projektionslicht (14)  
wenigstens zwei formdoppelbrechende Gitterstrukturen (581b,  
15 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) durchsetzt.

### Zusammenfassung

=====

Eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage umfaßt eine Beleuchtungseinrichtung (12) zur Erzeugung von Projektionslicht (14), ein Projektionsobjektiv (20) zum Abbilden eines Retikels (14) auf eine lichtempfindliche Oberfläche (30) und ein in dem Projektionsobjektiv (20) angeordnetes optisches Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) zum Einstellen einer gewünschten Polarisierung des Projektionslichts (14). Das optische Element (54; 54a; 54b; 54c; 54d) hat einen Träger (56; 66; 561b, 562b; 561c, 562c; 66; 34) sowie mindestens eine darauf angeordnete und von dem Projektionslicht (14) durchsetzbare Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c, 573c; 57d) mit formdoppelbrechenden Gitterstrukturen (58; 58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d), deren Abstand (g) voneinander kleiner als die Wellenlänge des Projektionslichts (14) ist. Die Anordnung der Gitterstrukturen (58; 58a; 581b, 582b; 581c, 582c, 583c; 58d) variiert lokal innerhalb der mindestens einen Schicht (57; 57a, 571b, 572b; 571c, 572c; 57d). Das optische Element ermöglicht es, unerwünschte Einflüsse von doppelbrechenden optischen Komponenten wie z.B.  $\text{CaF}_2$ -Linsen beinahe vollständig zu kompensieren.

(Figur 2)

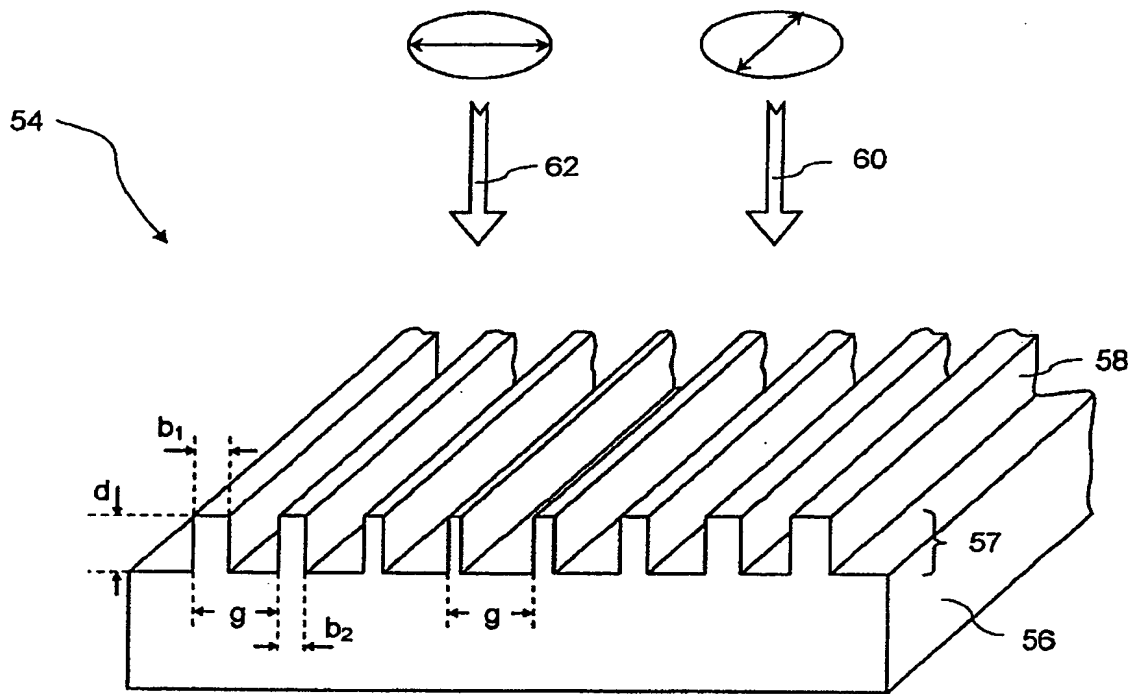


Fig. 2

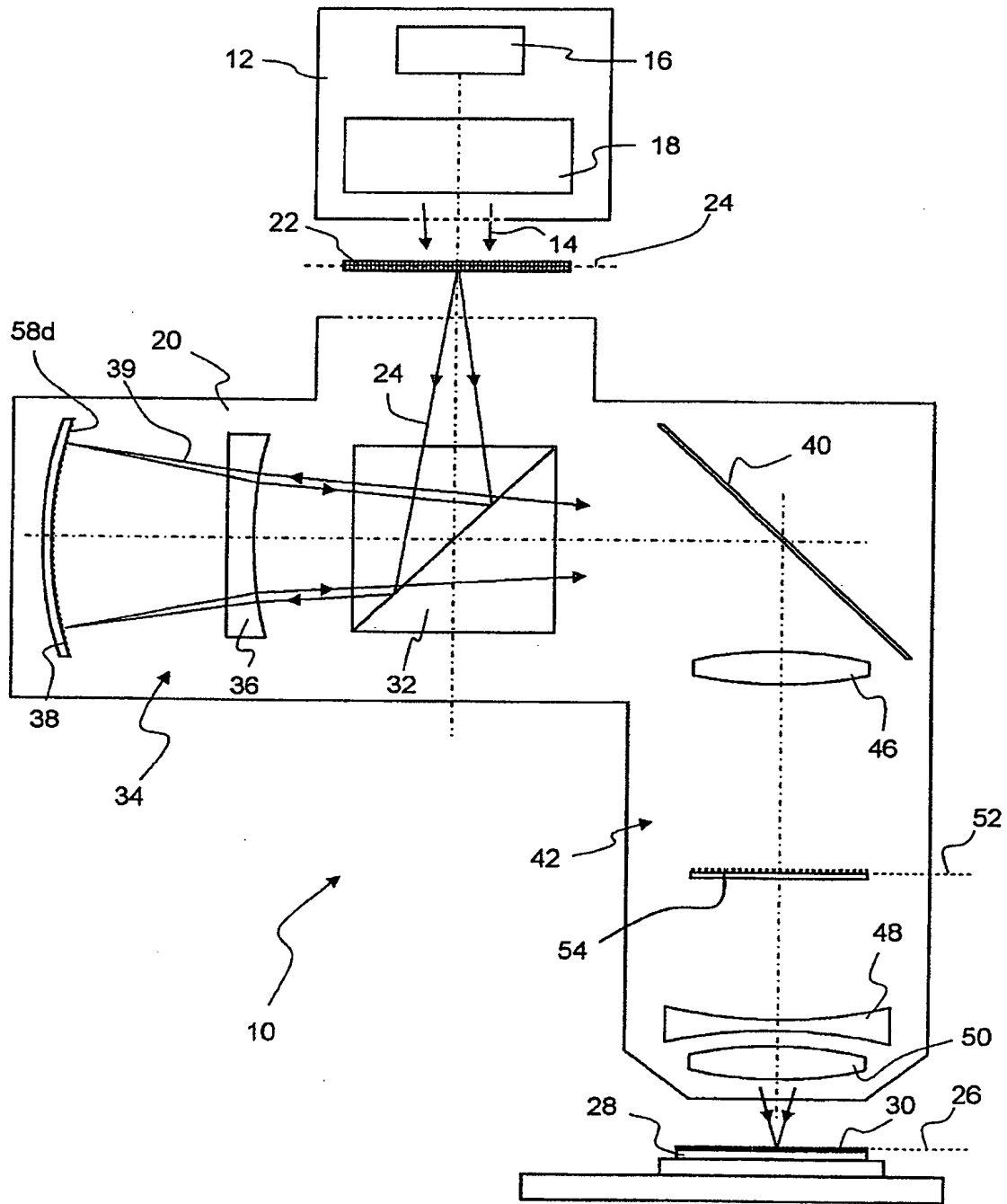


Fig. 1

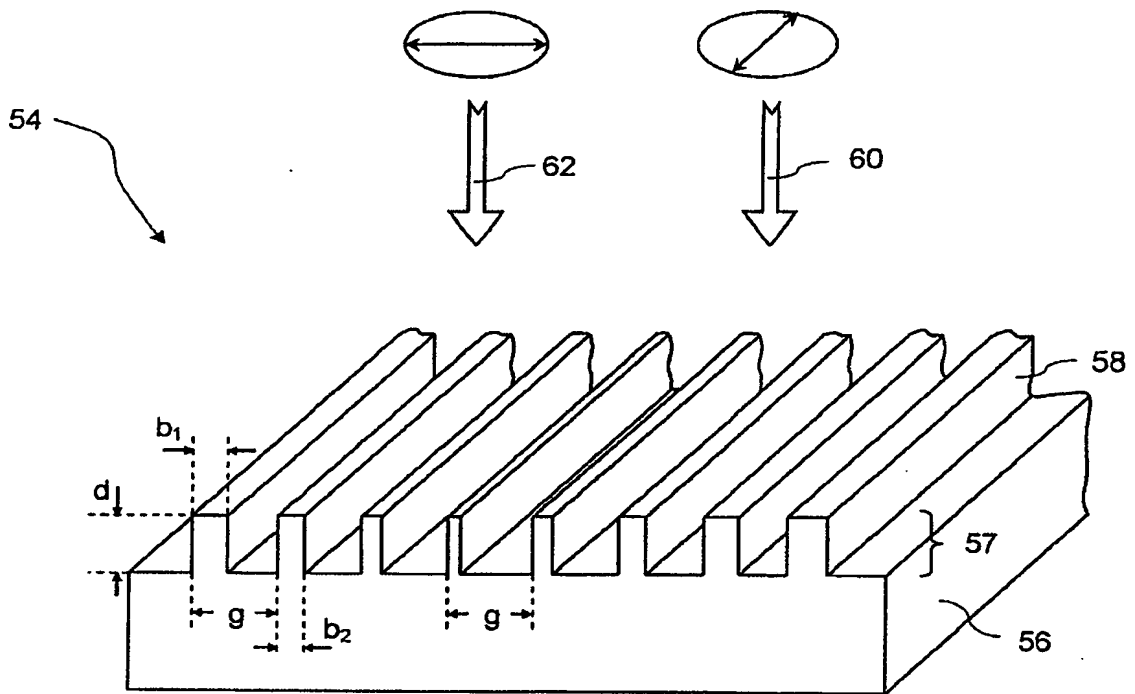


Fig. 2

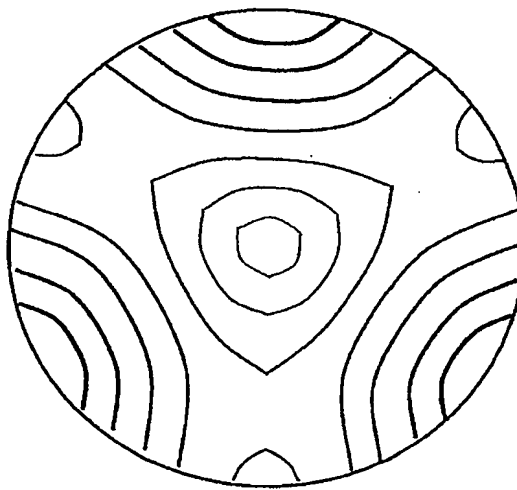


Fig. 3

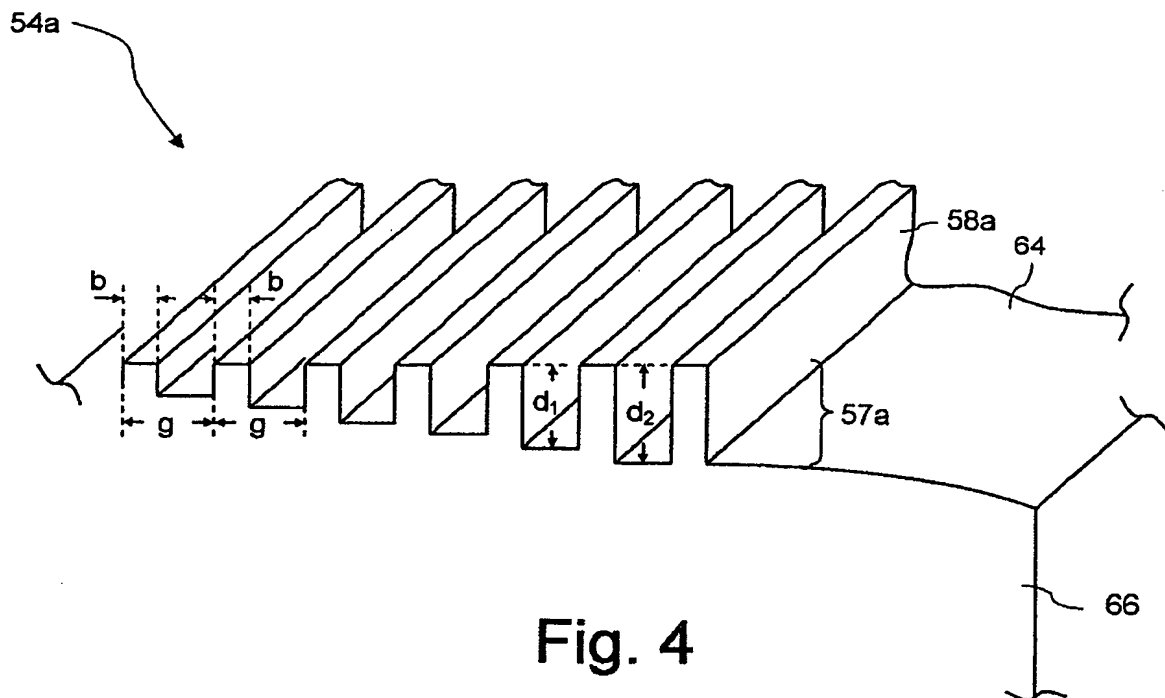


Fig. 4

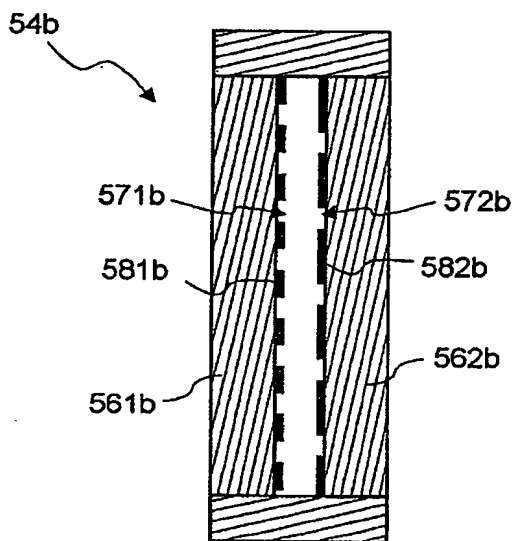


Fig. 5

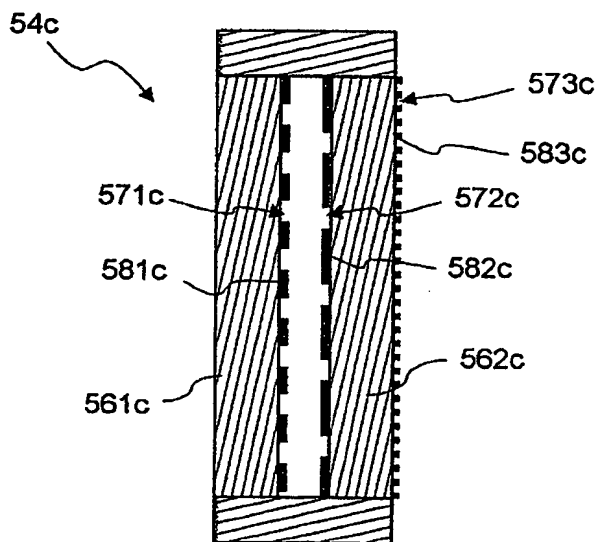


Fig. 6



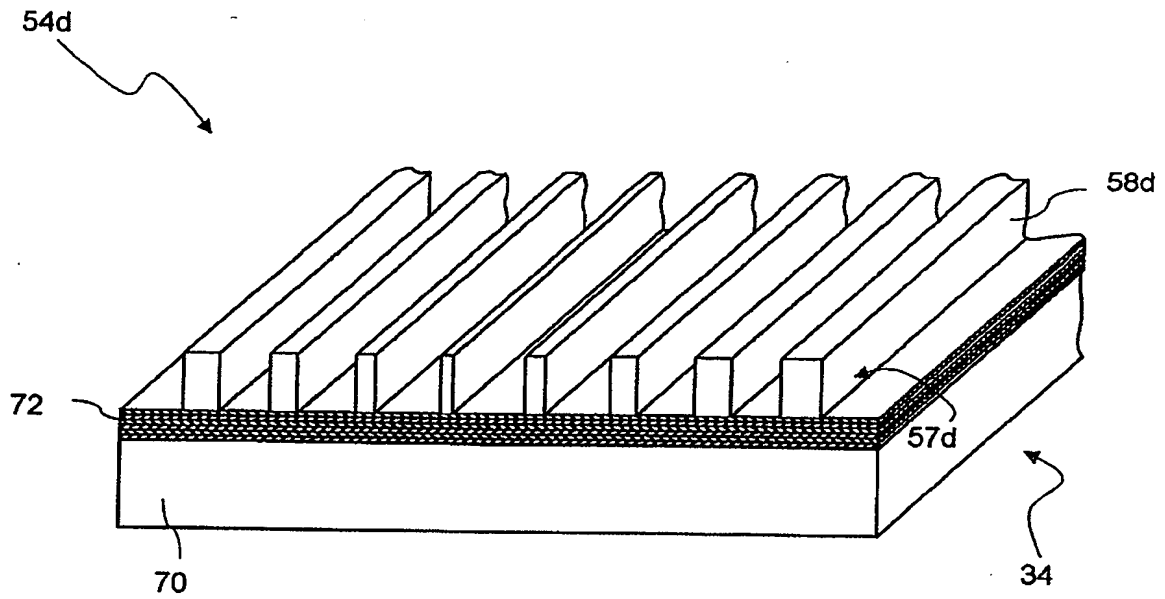


Fig. 7